

$$Nu = c \cdot Re^n \cdot Pr^{0,33}$$

Данные испытаний представлены в таблице.

Данные испытаний КПРТ

Параметр	Номер испытания							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Расход воды, кг/с	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Расход воздуха, кг/с	1,88	1,77	1,62	1,46	1,31	1,21	1,09	0,88
Температура воды на входе, °С	72,8	73,1	73,4	74,0	74,6	75,0	75,5	75,8
Температура воды на выходе, °С	51,1	51,8	53,2	54,5	55,7	57,3	59,3	60,9
Температура воздуха на входе, °С	24,2	24,2	24,1	23,8	23,8	24,0	23,9	23,9
Температура воздуха на выходе, °С	31,8	32,1	32,3	32,6	33,3	33,6	33,7	35,0
Тепловая мощность, кВт	18,6	18,2	17,3	16,7	16,2	15,2	13,9	12,7

Обработка этих экспериментальных данных позволила получить эмпирическую зависимость числа Нуссельта от Рейнольдса при теплоотдаче от воздуха к пакетам с трапециевидным рассечением с турбулизаторами в виде:

$$Nu = 0,0367 \cdot Re^{0,85} \cdot Pr^{0,33}$$

Результаты расчетов позволили разработать и выдать рекомендации по проектированию и созданию энергоэффективного оборудования.

#### Список использованных источников

1. Компактные теплообменники / В. М. Кейс, А. Л. Лондон. М. : Энергия, 1967. 224 с.
2. Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников. Ч. 1. Теоретические основы: учебное пособие / А. В. Чичиндаев. Новосибирск. : Изд-во НГТУ, 2003. 400 с.

УДК 662.76

Ральников П. А., Абаймов Н. А.  
Уральский федеральный университет  
ral-pavel@mail.ru

## МЕТОДИКА ОТРАБОТКИ И КАЛИБРОВКИ МОДЕЛЕЙ ПОТОЧНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ

**Аннотация.** В работе рассмотрена одна из технологий энерго- и ресурсосбережения в угольной энергетике, а именно поточный газификатор, как ключевой элемент парогазовой установки с внутрицикловой газификацией. Представлено описание математических моделей, используемых для численного исследования термохимических процессов в поточных газификаторах. Приведены схемы работы и параметры экспериментов на лабораторном и

полупромышленном поточных реакторах. Рассмотрена методика калибровки расчётных моделей с использованием экспериментальных данных.

**Введение.** Необходимость повышения уровня энерго- и ресурсосбережения вынуждает инженеров разрабатывать всё новые энергетические технологии. Одним из перспективных направлений мировой угольной энергетики и полигенерации являются технологии термохимической переработки твердых топлив в искусственный газ (синтез-газ), пригодный для производства электроэнергии. Данный процесс осуществляется в газификационных установках различной конструкции, наиболее энергонапряжёнными из которых считаются поточные газификаторы. Разработка высокоэффективных теплоэнергетических установок такого рода является комплексной задачей, требующей помимо экспериментальных исследований численное моделирование.

**Описание моделей.** Для моделирования поточных газификаторов требуется использование нескольких специфичных математических моделей. Актуальность и применимость конечного результата моделирования непосредственно зависит от качества этих моделей. Решающее значение при газификации имеет точное описание термохимических процессов. Учитывая экстремальные условия (большое давление и температуру) и зашлакованность внутри промышленного газификатора, почти невозможно осуществить замеры необходимые для верификации математических моделей. По этим причинам модели газификации угля должны быть откалиброваны и отработаны с помощью данных лабораторных экспериментов, в которых возможно детально исследовать процесс выхода летучих, конверсии коксового остатка и т.д.

Ниже дана краткая характеристика нескольких наиболее популярных моделей, используемых при исследовании газификации твёрдого топлива.

1. Модель концепции рассеивания вихря (The Eddy Dissipation Concept, EDC) [1] объясняет турбулентно-химическое взаимодействие (TCI). Она использует детальный кинетический механизм из GRI-MECH suite, включающий 103 реакции между 22 веществами. Эта модель была успешно использована для частичного окисления газов [2] при сжигании и газификации угля.

2. P-1 механизм моделирования радиационного излучения [3] предполагает, что излучающие свойства газа определяются моделью серой группы, основанной на концепции взвешенной суммы серых газов (Weighted Sum of Gray Gases, WSGG) [4].

3. Траектория движения частиц угля традиционно моделируется с использованием метод Лагранжа. Влияние турбулентного потока на траекторию частиц объясняется посредством стохастического метода, включающего случайный компонент турбулентной скорости.

4. Пиролиз моделируется эмпирической конкурирующей двухступенчатой моделью (C2SM). Необходимые параметры оцениваются в соответствии с процедурой калибровки, разработанной авторами [5] с помощью встроенного препроцессора кинетики пиролиза угля.

Вышеописанные модели не являются универсальными, поэтому для

каждого режима газификации необходимо отрабатывать и калибровать модели с использованием экспериментальных данных. Рассмотрим этот процесс на примере методики исследования, проведённого в Technische Universität Bergakademie Freiberg (Германия) [6]. Для проведения лабораторных и опытно-промышленных экспериментов данный университет использует лабораторный поточный реактор под давлением (PEFR) и полупромышленный поточный газификатор Siemens.

Описание экспериментальных установок. Реактор PEFR с внутренним диаметром 70 мм и длиной 2100 мм (рис. 1) предназначен для экспериментального исследования процесса газификации различных твёрдых топлив под высоким давлением.

Угольные частицы вводятся в реактор вместе с инертным газом ( $N_2$ ) через центральное сопло, а предварительно нагретая дутьевая смесь подаётся через кольцевой канал. Стенки реактора нагреваются до температуры 1500 °С электрическим нагревателем. Экспериментальные данные получены при давлении 20 бар и температуре стенок 1100-1400 °С. Температуры угля и транспортирующего газа равнялись температуре окружающей среды, а кислород предварительно нагревали до температуры 900 °С.

Эксперименты на пилотном газогенераторе Siemens 5 МВт (рис. 2) проводились при давлении в 26 бар. Расход угля составлял 280-360 кг/ч, транспортным агентом был инертный газ, в основном состоящий из  $N_2$  (около 87 %). Окислитель, состоящий из почти чистого  $O_2$ , подавался в реактор с расходом 270-330 м<sup>3</sup>/ч. Для стабилизации процесса газификации осуществлялась подсветка природным газом с расходом 30-50 м<sup>3</sup>/ч.

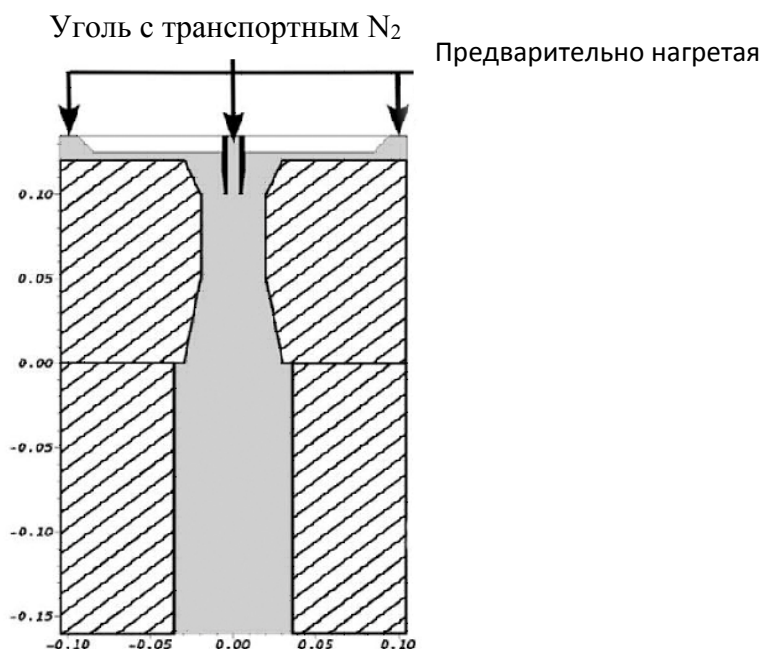


Рис. 1. Схема входа сред в реактор PEFR

Калибровка моделей. На первом этапе калибровки были оценены кинетические константы газификации кокса углей термогравиметрическим анализом в диффузионно-кинетическом режиме. Следующим этапом являлось

исследование газификации кокса при высоких температурах в поточном реакторе под давлением в режиме внутрипористого реагирования.

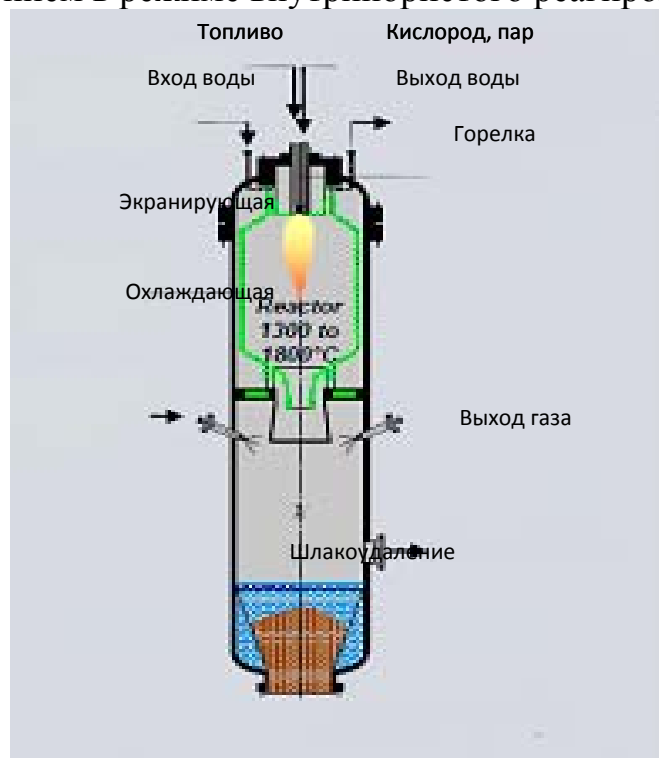


Рис. 2. Схема газогенератора Siemens

На завершающем этапе ранее полученные результаты были протестированы при моделировании полупромышленного газификатора Siemens. Результаты моделирования оказались достаточно близки к эксперименту по составу синтез-газа и степени конверсии углерода на выходе из реактора. Несмотря на то, что опытно-промышленные эксперименты позволяют проводить измерения только на выходе из реактора, модели были протестированы при работе в широком диапазоне условий эксплуатации.

**Заключение.** Кафедра ТЭС УрФУ уже на протяжении длительного времени занимается работой, аналогичной вышеописанному исследованию, в том числе по изучению конверсии кокса антрацита в воздушной среде при разных расходах окислителя [7], по разработке низкотемпературных реакторов термохимической конверсии для угольной энергетики [8], и по отработке моделей поточной газификации угля [9].

#### Список использованных источников

1. Gran I. R., Magnussen B. F. A numerical study of a bluff-body stabilized diffusion flame. Part 1. Influence of turbulence modeling and boundary conditions // Combust Sci Technol. 1996. № 119. P. 1-6.
2. Rehm M., Seifert P., Meyer B. Theoretical and numerical investigation on the EDC-model for turbulence–chemistry interaction at gasification conditions // Comput Chem Eng. 2009. P. 402-407.
3. Cheng P. Two-dimensional radiating gas flow by a moment method // AIAA J. 1964 № 2 (9). P. 4.
4. Smith T. F., Shen Z. F., Friedman J. Evaluation of coefficient for the weighted sum of gray gases model // ASME J Heat Transfer. 1982. № 104. P. 602–608.
5. Vascellari M., Arora R., Pollack M., Hasse C. Simulation of entrained flow gasification

with advanced coal conversion submodels. Part 1: Pyrolysis // Fuel. 2013. № 113(0). P. 654–659.

6. Michele Vascellari, Daniel G. Roberts, San Shwe Hla, David J. Harris, Christian Hasse. From laboratory-scale experiments to industrial-scale CFD simulations of entrained flow coal gasification // Fuel. 2015. № 152. P. 58-73.

7. Худякова Г. И., Осипов П. В., Рыжков А. Ф. Конверсия кокса антрацита в воздушной среде при разных расходах окислителя // Научное обозрение. 2014. № 8-1. С. 139-144.

8. Рыжков А. Ф., Богатова Т. Ф., Вальцев Н. В., Гордеев С. И., Худякова Г. И., Осипов П. В., Абаимов Н. А., Чернявский Н. В., Шульман В. Л. Разработка низкотемпературных реакторов термохимической конверсии для угольной энергетики // Теплоэнергетика. 2013. № 12. С. 47-55.

9. Абаимов Н. А., Рыжков А. Ф. Разработка модели поточной газификации угля и отработка аэродинамических механизмов воздействия на работу газогенераторов // Теплоэнергетика. 2015. № 11. С. 3-8.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524).*

УДК 37.013.75

Рахимова Ю. И.  
Самарский государственный технический университет  
JuliyRahimova@yandex.ru

## **ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ КОМПЕТЕНТНОСТЬ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ БАКАЛАВРОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ФАКУЛЬТЕТОВ**

**Аннотация.** В работе проанализирована необходимость внедрения в учебно-воспитательный процесс теплоэнергетических факультетов актуальное и востребованное направление подготовки в области энергосбережения. Обосновывается необходимость формирования профессиональной компетентности в сфере энергосбережения у студентов теплоэнергетических факультетов. Рассмотрен процесс формирования профессиональной компетентности в области энергосбережения.

Для современной энергетики требуются профессионалы высокой степени квалификации, образованные и обладающие широким спектром компетенций, умеющие ориентироваться в потоке новой информации, способные быстро и четко решать сложные производственные задачи при постоянно изменяющихся условиях. Однако кадровый состав теплоэнергетических предприятий указывает на нехватку нужного количества квалифицированных работников [1]. Решение данной проблемы требует существенного изменения системы подготовки студентов технических вузов, обучающихся по направлению 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника» в области энергосбережения и энергосберегающих техно-